Op-amp als spanningsversterker

Op-amp's zijn zeer universele onderdelen, maar in de praktijk worden deze IC's voornamelijk gebruikt in filters en spanningsversterkers. In dit artikel wordt deze laatste toepassing uitgebreid besproken met praktische voorbeeldschakelingen.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl

Publicatiedatum: 22-02-2023

Spanningsversterkers met op-amp's

Operationele versterker is ideale spanningsversterker

Operationele versterkers zijn op verschillende manieren te gebruiken voor het versterken van spanningen. U kunt zonder overdrijven stellen dat deze toepassing een van de meest gebruikte in de analoge elektronica is! Dat operationele versterkers zo vaak worden gebruikt voor het versterken van spanningen is een rechtstreeks gevolg van het feit dat een op-amp een zo goed als ideaal onderdeel is voor dit soort toepassingen. Denk hierbij aan de onderstaande eigenschappen van op-amp's:

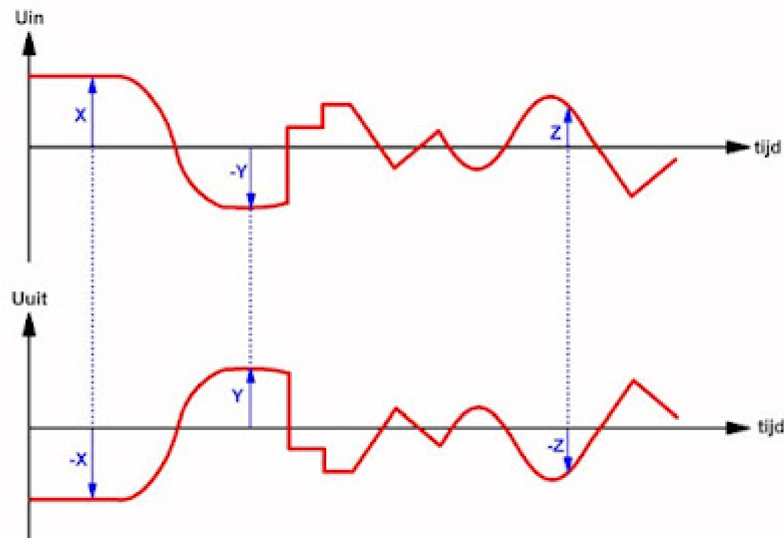
- Het beschikbaar zijn van twee ingangen die geïnverteerd ten opzichte van elkaar werken, ideaal voor het onafhankelijk van elkaar instellen van versterking en terugkoppeling.
- Zeer hoge eigen ingangsweerstand op beide ingangen, zodat u de reële ingangsweerstand van de schakeling volledig door passieve onderdelen kunt vastleggen.
- Zeer lage eigen uitgangsweerstand, waardoor de uitgangskarakteristieken van de versterker nauwelijks worden beïnvloed door de op de schakeling aangesloten belasting.
- Zeer hoge open-lus versterkingsfactor, waardoor u de reële versterking van een schakeling volledig door de terugkoppeling kunt instellen.

Zeven soorten spanningsversterkers
Er bestaan diverse soorten spanningsversterkers:
- Spanningsvolgers.
- Omkeerversterkers.
- Inverterende versterkers.
- Niet-inverterende versterkers.
- Brugversterkers.
- Verschilversterkers.
- Instrumentatieversterkers.

Over het gebruik van op-amp's als spanningsvolger, brugversterker, verschilversterker en instrumentatieversterker zijn op dit blog eigen artikelen verschenen. In dit verhaal gaat het over de drie overige soorten spanningsversterkers.

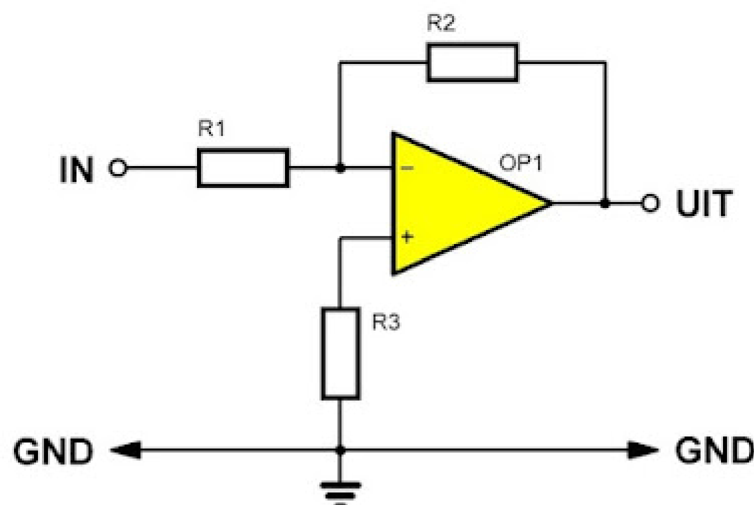
De op-amp als omkeerversterker

Wat is een omkeerversterker?
Een omkeerversterker is een versterker die de absolute waarde van het ingangssignaal niet verandert, maar wél de polariteit ervan omkeert. Een ingangsspanning van +2,35 V levert een uitgangsspanning op van -2,35 V. Wordt de ingangsspanning -0,45 V, dan gaat de uitgang naar +0,45 V. In de onderstaande figuur is de relatie tussen de in- en de uitgangsspanning van een omkeerversterker getekend. Wiskundig kunt u de werking van een omkeerversterker definiëren door:
$U_{uit} = -U_{in}$
De spanningsversterking is dus gelijk aan -1.



De in- en uitgangsspanningen van een omkeerversterker.
(© 2023 Jos Verstraten)

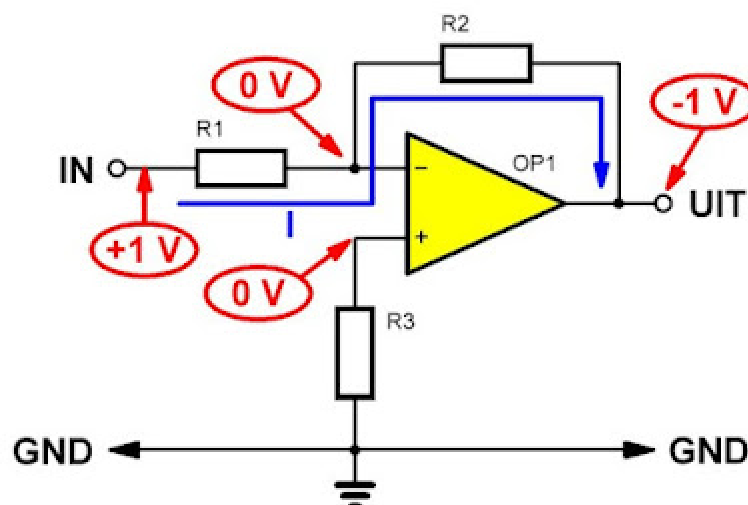
Basisschakeling van een omkeerversterker
De basisschakeling van een omkeerversterker met een operationele versterker is getekend in de onderstaande figuur. De niet-inverterende ingang (+) van de operationele versterker gaat via een weerstand R3 naar de massa. De inverterende ingang (-) is aangesloten op het knooppunt van twee weerstanden R1 en R2, die even groot zijn. Eén weerstand gaat naar de ingang IN, de tweede gaat naar de uitgang UIT.
De belangrijkste eigenschap van een omkeerversterker is dat beide weerstanden R1 en R2 identiek moeten zijn. De weerstand R3 is gelijk aan de helft van de waarde van R1 en R2.



Basisschakeling van een omkeerversterker.
(© 2023 Jos Verstraten)

Verklaring van de werking

In de onderstaande figuur is het schema van de omkeerversterker nog eens getekend, maar nu met ingevulde spanningen en stromen. U kunt de werking verklaren, zoals steeds bij schakelingen met operationele versterkers, aan de hand van het gegeven dat de op-amp er naar zal streven de spanningen op beide ingangen identiek te maken. Aan de ingang van de schakeling legt u bijvoorbeeld een spanning van +1 V aan. De niet-inverterende ingang van de op-amp ligt via de weerstand R3 aan de massa en staat dus op een spanning van 0 V. De op-amp zal er voor zorgen dat ook zijn inverterende ingang op een spanning van 0 V komt te staan. Over de weerstand R1 valt dus een spanning van 1 V. Het gevolg is dat door deze weerstand een bepaalde stroom I vloeit, waarvan de waarde wordt bepaald door de grootte van de ingangsspanning en de waarde van de weerstand R1. Deze stroom kan alleen afvloeien via de weerstand R2.
De inverterende ingang van de op-amp heeft immers een zeer hoge weerstand en de stroom die via deze weerstand afvloeit is te verwaarlozen. Het gevolg is dat de stroom I door de weerstand R2 vloeit en over deze weerstand een spanning opbouwt. Omdat beide weerstanden even groot zijn zal de spanningsval over beide weerstanden identiek zijn. Over R1 valt een spanning van 1 V, dezelfde spanning kunt u meten over weerstand R2.
Omdat de stroom I de twee weerstanden in identieke richting doorloopt zullen ook de polariteiten van beide spanningen identiek zijn. De linker aansluiting van R1 is positief ten opzichte van de rechter aansluiting. Hetzelfde geldt voor R2 en omdat de linker aansluiting op 0 V staat moet de rechter op een spanning van -1 V staan.
De uitgangsspanning heeft dus dezelfde grootte als de ingangsspanning, maar de tegengestelde polariteit.

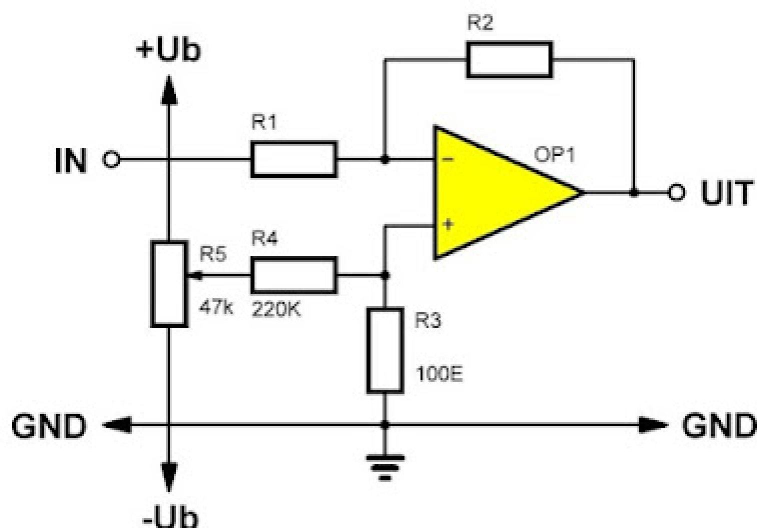


Verklaring van de werking van een omkeerversterker.
(© 2023 Jos Verstraten)

Eigenschappen van de omkeerversterker
De ingangsweerstand van een omkeerversterker wordt volledig bepaald door de waarde van de weerstand R1. De inverterende ingang ligt immers op 0 V en deze spanning wordt door de schakeling gezien als '*massa*'. Hoewel deze ingang niet echt aan de massa ligt lijkt het, zuiver technisch gezien, wel zo. Dat noemt men een '*virtueel massapunt*' en deze techniek kunt u bijvoorbeeld gebruiken voor het bouwen van mengversterkers (lees verder).
Zoals ondertussen bekend is de spanningsversterking van een omkeerversterker gelijk aan -1.

Offsetcompensatie bij de omkeerversterker
Als u gebruik maakt van viervoudige operationele versterkers en de offsetcompensatie dus extern moet aanbrengen kunt u gebruik maken van de schakeling die in de onderstaande figuur is getekend. De niet-inverterende ingang gaat nu via een kleine weerstand R3 naar de massa. Over deze weerstand wordt de compensatiespanning aangesloten. Hierbij staan +Ub en -Ub voor de voedingsspanningen van de schakeling. Door het verdraaien van de loper van de instelpotentiometer R5 kunt u de niet-inverterende ingang instellen op een zeer kleine

positieve of negatieve spanning. Op deze manier kunt u de eigen offsetspanning van de toegepaste op-amp compenseren.



Compenseren van de offset van de op-amp.
(© 2023 Jos Verstraten)

Praktische toepassingen van de omkeerversterker
Een omkeerversterker moet u gebruiken als u twee wisselspanningssignalen nodig hebt, die ten opzichte van elkaar geïnverteerd zijn. Nu eindversterkers met buizen weer populair zijn kunt u in dat soort push-pull eindtrappen omkeerversterkers inzetten voor het genereren van de twee 180° in fase gedraaide signalen waarmee u de stuurroosters van de eindpenthoden kunt sturen. Ook voor halfgeleider eindversterkers die in brug zijn geschakeld hebt u een omkeerversterker nodig voor het genereren van de twee 180° in fase gedraaide signalen.

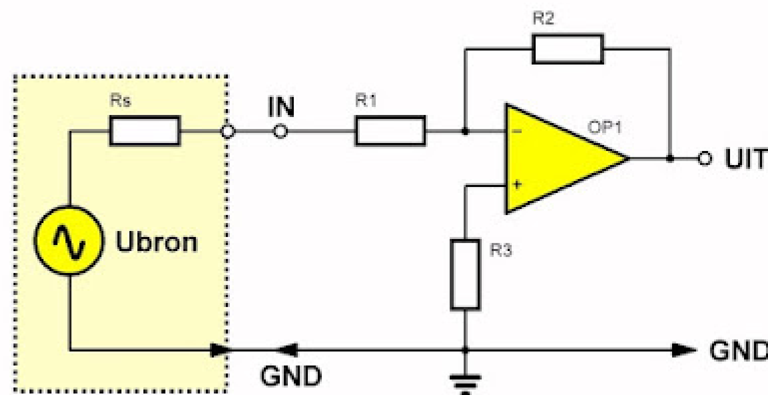
De op-amp als inverterende versterker

Inleiding
Een inverterende versterker heeft in principe exact dezelfde opbouw als een omkeerversterker. De omkeerversterker is immers een speciaal geval van de inverterende versterker, waarbij de spanningsversterking gelijk wordt gesteld aan -1. Het enige verschil is dat nu de twee weerstanden R1 en R2 niet aan elkaar gelijk zijn, maar de spanningsversterking van de trap vastleggen.

De versterking van de inverterende versterker
De versterking van de schakeling wordt inderdaad bepaald door de verhouding tussen de weerstanden R1 en R2. Hoe groter R2 ten opzichte van R1, hoe groter de versterking.
Deze verhouding is in een erg eenvoudige formule samen te vatten:
$U_{uit} = -[U_{in} \cdot (R2 / R1)]$
Het min-teken duidt op de inverterende werking van de schakeling.
De verklaring van deze versterkingsfactor kan op dezelfde manier gebeuren als bij de omkeerversterker. Als er aan de ingang een spanning wordt aangelegd, dan zal deze spanning een stroom door de weerstand R1 sturen. Omdat de inverterende ingang op massapotentiaal staat, wordt de grootte van deze stroom alleen bepaald door de waarde van de ingangsspanning en van de weerstand.
Deze stroom kan alleen via de weerstand R2 afvloeien naar de uitgang. Over deze weerstand wordt dus ook een spanning opgewekt, waarvan de grootte afhankelijk is van de waarde van de weerstand en van de stroom. Als R2 gelijk is aan 2 • R1, dan zal er ook een dubbel zo grote spanning over R2 ontstaan. Omdat de linker aansluiting van deze weerstand aan de massa ligt, zal deze spanning dus op de uitgang verschijnen.

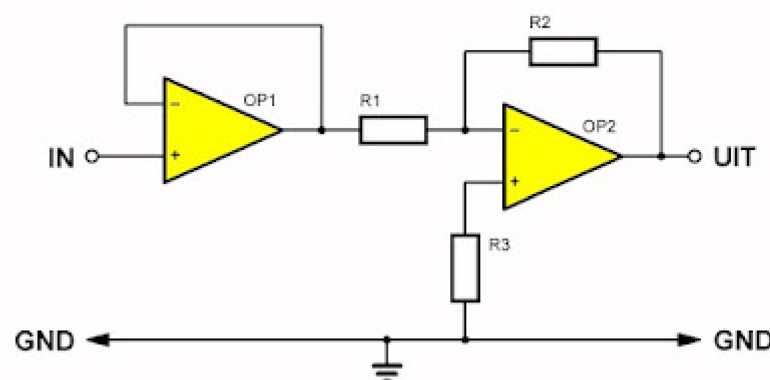
Een inverterende versterker waarvan de weerstand R1 gelijk is aan 1 kΩ en de weerstand R2 gelijk is aan 100 kΩ zal dus honderd keer versterken. Een wel heel eenvoudige manier om de versterkingsfactor van een schakeling op een gewenste waarde in te stellen!

De invloed van de bron
De versterking van de schakeling hangt helaas niet alleen af van de verhouding tussen R1 en R2. Dat kan verklaard worden aan de hand van het onderstaande schema.
De inverterende versterker wordt uiteraard aangesloten op een signaalbron. Deze schakeling levert een spanning U_{bron}, in de meeste gevallen een wisselspanning, maar heeft ook een bepaalde inwendige weerstand. In het schema wordt deze voorgesteld door de weerstand R_s. Deze weerstand staat in serie met de weerstand R1 van de inverterende versterker. Het lijkt dus net alsof deze weerstand groter wordt! Het gevolg is dat de versterkingsfactor van de schakeling in de praktijk gegeven wordt door de formule:
$U_{uit} = -[U_{in} \cdot (R2 / \{R1+R_s\})]$
De praktische versterkingsfactor is dus lager dan de theoretische.



De invloed van de inwendige weerstand van de bron.
(© 2023 Jos Verstraten)

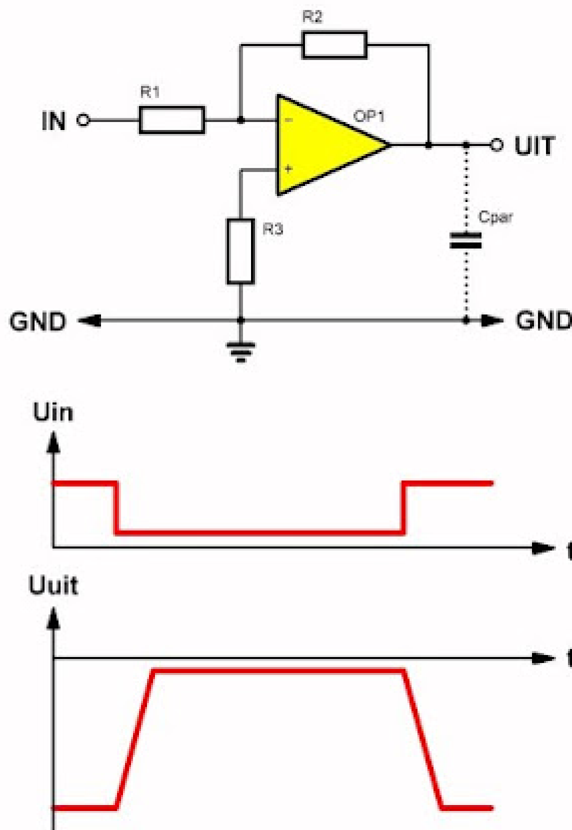
Uitschakelen van de invloed van de bronweerstand
Moet u een versterker ontwerpen met een zeer nauwkeurig vastgestelde versterkingsfactor, dan moet u op de een of andere manier de invloed van de inwendige weerstand van de bron uitsluiten. Dat is alleen mogelijk door tussen de bron en de inverterende versterker een spanningsvolger te schakelen. Een praktisch bruikbare schakeling is getekend in de onderstaande figuur. De versterkingsfactor van de schakeling is nu alleen maar afhankelijk van de verhouding van de weerstanden R1 en R2 en wordt niet meer beïnvloed door de bron.

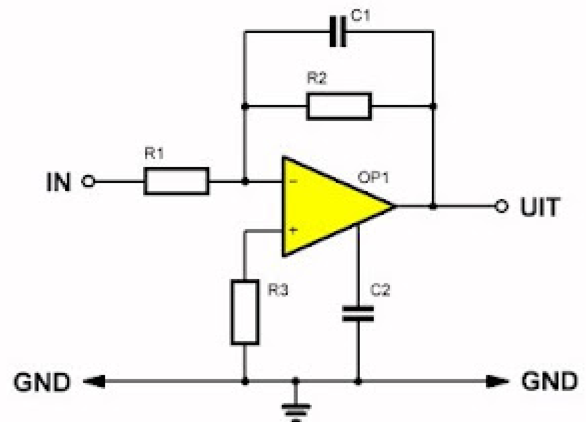


Uitschakelen van de invloed van de inwendige weerstand van de bron.
(© 2023 Jos Verstraten)

Het frequentiegedrag van de inverterende versterker
In het linker schema van de onderstaande figuur is getekend wat er gebeurt als u aan een inverterende versterker een blokspanning aanlegt. Zo'n blokspanning heeft zeer steile voor- en achterflanken en deze vertegenwoordigen zeer hoge frequenties. Op de uitgang van de

schakeling staat een parasitaire capaciteit C_{par} naar de massa geschakeld. Dat is een gevolg van het feit dat iedere geleider een bepaalde capaciteit heeft naar de massa, dus ook de printspoortjes op de print.
Door deze capaciteit zal de versterking voor hogere frequenties beïnvloed worden en wel zo dat de versterking veel lager is dan deze voor gelijkspanning. Dat verschijnsel wordt erger naarmate de schakeling is ingesteld op een hogere versterkingsfactor. Hoe hoger deze waarde, hoe groter immers R2 en hoe meer invloed de capaciteit op de schakeling heeft.
Het gevolg van een en ander is dat de uitgangspuls geen mooie blokvormige puls is, maar dat de voor- en de achterflank behoorlijk vertraagd worden.





Frequentiecompensatie bij de inverterende versterker. (© 2023 Jos Verstraten)

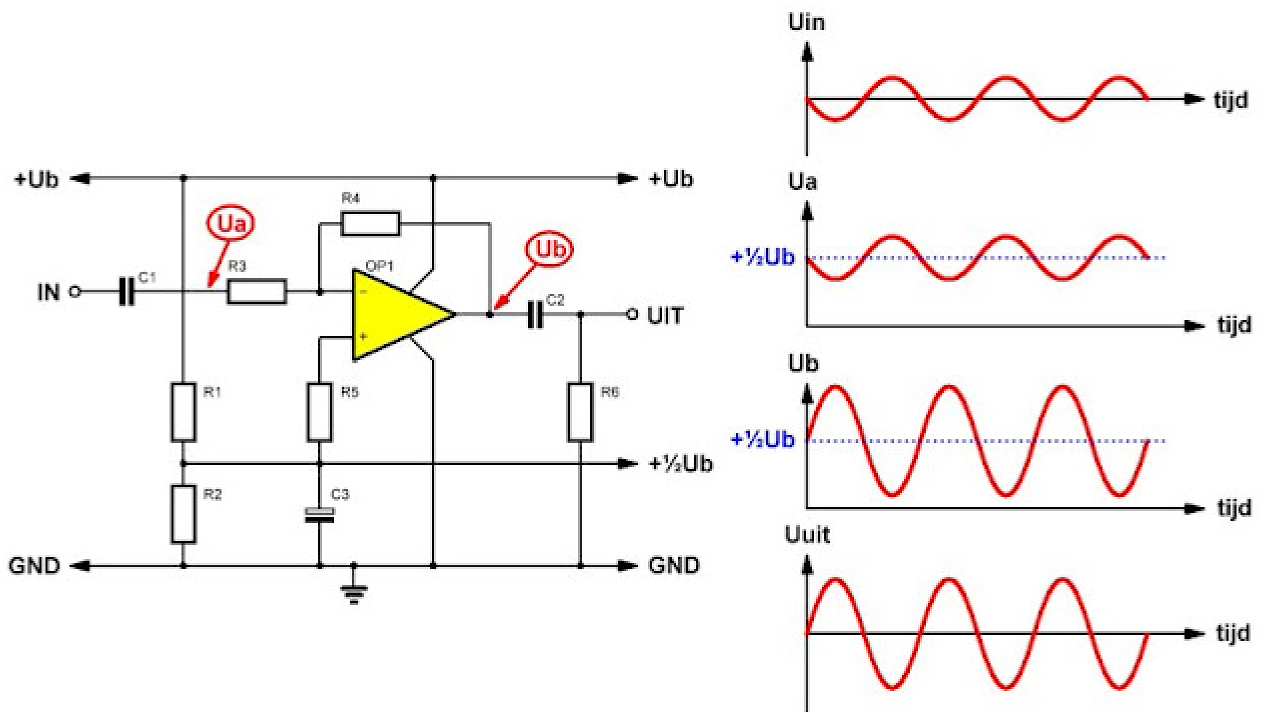
Dit verschijnsel kunt u voor een deel compenseren door de operationele versterker te voorzien van een frequentiecompensatie. In het rechter schema is dit voorgesteld. Het voornaamste onderdeel is de condensator C2. Deze wordt meestal geschakeld tussen de '*FREQCOMP*'-aansluiting van de operationele versterker en de massa. Maar een en ander is volledig afhankelijk van de interne schakelingen in de op-amp! Soms zijn er twee dergelijke ingangen aanwezig en is het de bedoeling de condensator daartussen op te nemen. Ook de waarde van dit onderdeel hangt af van het type op-amp. Vandaar dat u voor het compenseren van een op-amp steeds de gegevens van de fabrikant moet raadplegen.
Deze condensator zorgt ervoor dat de interne schakelingen in het IC overgecompenseerd worden. Daardoor neemt de versterking voor hogere frequenties toe, waardoor het effect van de parasitaire capaciteit op de uitgang wordt gecompenseerd.
Maar het introduceren van deze compensatie heeft wel tot gevolg dat op de uitgang '*overshoots*' ontstaan. Als de spanning heel snel van het ene naar het andere niveau springt zal de spanning op de uitgang iets '*doorschieten*', er verschijnen uitstervende oscillaties op de top van de signaalflank.
Om dit verschijnsel weer te compenseren wordt er over de terugkoppelingsweerstand R2 een kleine condensator C1 geschakeld. Deze heeft tot gevolg dat de versterkingsfactor voor hogere frequenties iets kleiner is dan voor gelijkspanning. De wisselstroomweerstand van de condensator staat immers parallel geschakeld over de weerstand R2. De wisselstroomweerstand van een condensator neemt af als de frequentie van het signaal stijgt. Voor lage frequenties zal de wisselstroomweerstand van de condensator veel en veel hoger zijn dan de waarde van de weerstand R2. U kunt zijn invloed dan verwaarlozen. Voor hoge

frequenties echter wordt de wisselstroomweerstand van de condensator vergelijkbaar met de waarde van de weerstand. De reële waarde van de terugkoppelingsweerstand gaat dus dalen en daarmee ook de versterking.

Kritische waarden!
De waarde van de twee compensatiecondensatoren is tamelijk kritisch en deze moet u van specifieke schakeling tot specifieke schakeling zorgvuldig op elkaar afstemmen. U kunt deze componenten berekenen, maar in de praktijk is het handiger om met behulp van een functiegenerator en een oscilloscoop de compensatie experimenteel te optimaliseren. Bepaal eerst een geschikte waarde voor C2 en pas nadien de waarde van C1 aan tot de schakeling minimale stijgtijden combineert met minimale overshoot op de flanken van het signaal.

De offsetcompensatie van de inverterende versterker
Hiervoor kunt u dezelfde schakeling gebruiken die reeds is besproken bij de omkeerversterker.

Niet symmetrische voeding
De tot nu toe beschreven schakelingen gaan er allemaal van uit dat de operationele versterker uit symmetrische spanningen wordt gevoed. Er staan twee even grote voedingsspanningen ter beschikking, maar met tegengestelde polariteit. Doordat de niet-inverterende ingang via een weerstand is verbonden met de massa staan beide ingangen ingesteld op 0 V, hetgeen precies het midden van het voedingsbereik is. U kunt dus de schakeling zowel positief als negatief maximaal uitsturen.
Vaak moet u echter een inverterende versterker gebruiken in een schakeling waar maar één meestal positieve voedingsspanning ter beschikking staat. U kunt dan het schema gebruiken dat in de onderstaande figuur is voorgesteld.
De operationele versterker wordt gevoed tussen de positieve voedingsspanning $+U_b$ en de massa. De niet-inverterende ingang gaat via de weerstand R5 naar het knooppunt van twee even grote weerstanden R1 en R2. Deze zijn aangesloten tussen de voeding en de massa, zodat er op hun knooppunt een spanning staat die gelijk is aan de helft van de voedingsspanning. Deze instelspanning $+½U_b$ staat dus ook op de niet-inverterende ingang.
De versterking van de schakeling wordt op de bekende manier ingesteld door middel van de twee weerstanden R3 en R4. Omdat ook nu de op-amp zal streven naar spanningsgelijkheid op beide ingangen zal de schakeling zich zó instellen dat in rust de twee ingangen en de uitgang op de helft van de voedingsspanning staan.
De schakeling kan nu maximaal uitgestuurd worden rond dit instelpunt, hetgeen ook duidelijk volgt uit de grafieken die rechts zijn getekend.



Niet symmetrisch voeden van een inverterende versterker. (© 2023 Jos Verstraten)

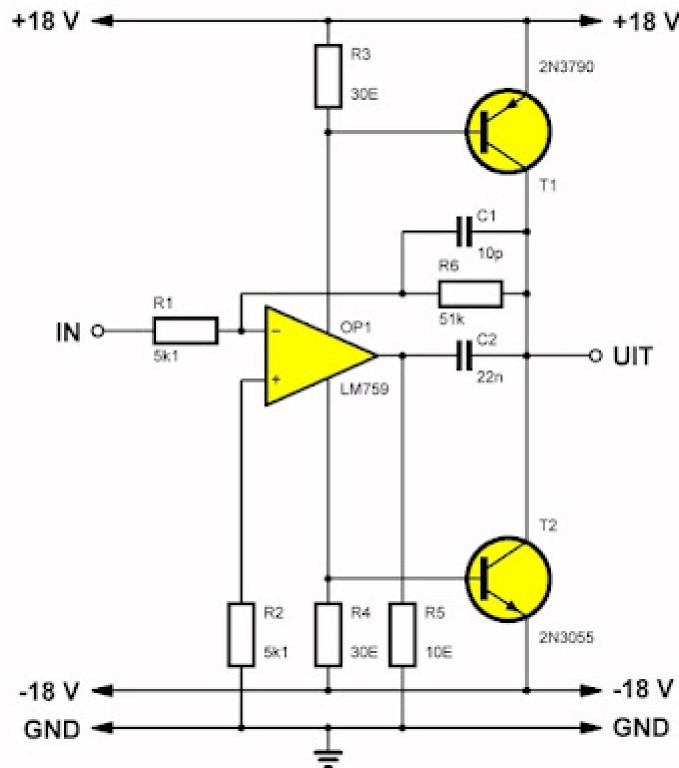
Het is nu echter wél noodzakelijk zowel de ingang als de uitgang van de versterker door middel van scheidingscondensatoren C1 en C2 met de overige schakelingen van het systeem te verbinden. Deze condensatoren verhinderen dat de instelspanning van +½U_b wegvloeit via de inwendige weerstand van de bron en de ingangsweerstand van de belasting. U moet de instelspanning +½U_b goed ontkoppelen door middel van een elco, in het schema voorgesteld door C3. De weerstanden R1 en R2 moeten laagohmig zijn, zeker als u de +½U_b niet alleen gebruikt voor het instellen van deze trap maar ook voor het instellen van andere trappen in uw schakeling.

De inverterende versterker in de praktijk

Inleiding
Hoewel de inverterende versterker één groot nadeel heeft, namelijk het feit dat de versterking van de trap mede bepaald wordt door de inwendige weerstand van de bron, zult u de inverterende versterker in de praktijk zeer vaak aantreffen als drivertrap van een complementaire eindtrap, als lijndriver of als mengversterker. Vooral dat laatste is een zeer belangrijk toepassingsterrein van de schakeling.
In de volgende paragrafen worden deze toepassingen toegelicht en wordt bovendien een zeer ongebruikelijke, maar wel handige toepassing van een inverterende versterker beschreven, namelijk een '*panning-versterker*'.

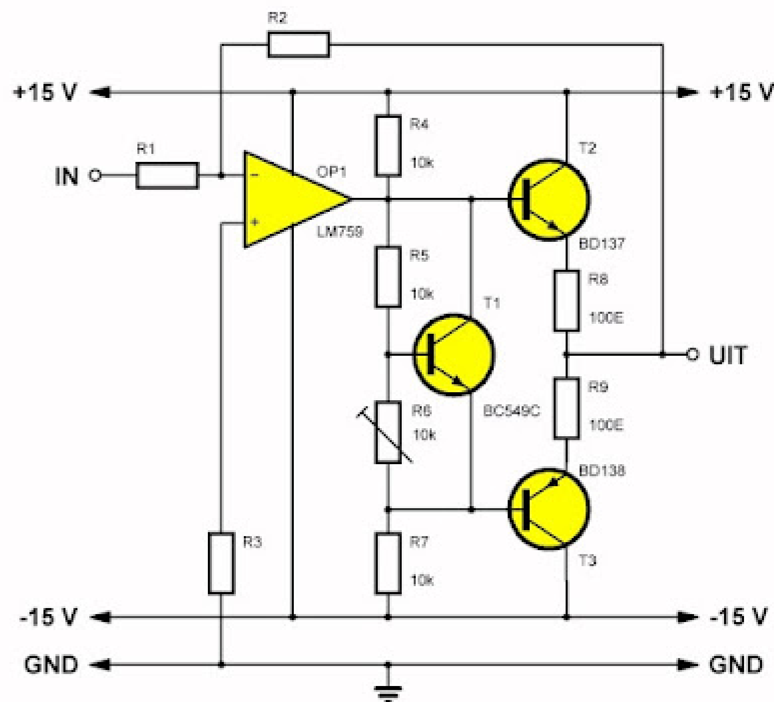
Voorbeeld van een driver voor complementaire eindtrappen
In de onderstaande figuur is een voorbeeld gegeven van een driver die twee complementaire eindtransistoren aanstuurt. De terugkoppeling die de versterking van de trap bepaalt wordt nu verbonden met het complementaire knooppunt dat tevens de uitgang van de versterker is. Uit de verhouding van de weerstanden R1 en R6 (5,1 kΩ en 51 kΩ) kunt u afleiden dat de spanningsversterking gelijk is aan tien. De eindtransistoren worden gestuurd uit de spanningsvallen die ontstaan over twee in serie met de voedingsaansluitingen van de op-amp opgenomen weerstanden R3 en R4. Let ook nu op de frequentie-compenserende condensator C1 over de weerstand van 51 kΩ.
Op deze schakeltechnisch zeer eenvoudige manier kunt u eindversterkers met indrukwekkende prestaties ontwerpen. Het getekende voorbeeld, een ontwerp van National Semiconductor, levert 18 W aan een belasting van 8 Ω bij een bandbreedte van 85 kHz. De

vervorming is kleiner dan 0,2 % bij 10 $V_{effectief}$ op de uitgang en een signaal met een frequentie van 1 kHz.



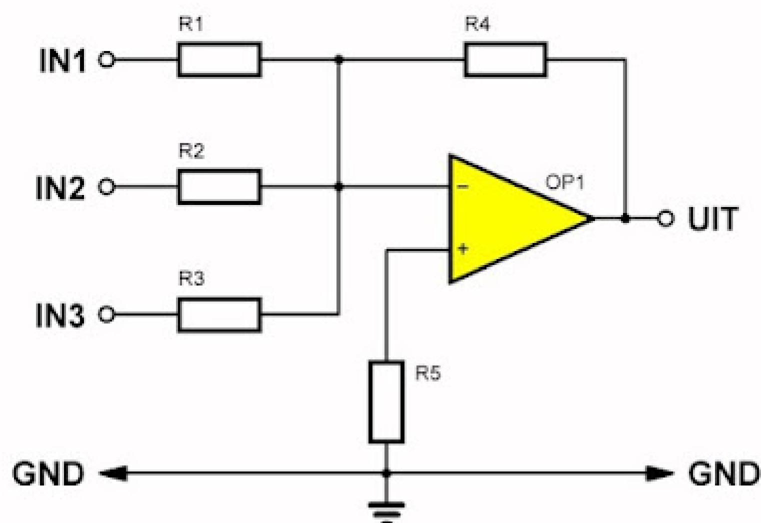
Voorbeeldschakeling van een complementaire eindversterker.
(© 2023 Jos Verstraten)

Voorbeeld van een lijndriver
In de onderstaande figuur wordt een eenvoudige lijndriver, ontwikkeld door National Semiconductor, voorgesteld. Met een dergelijke schakeling kunt u een signaal over een zeer lage uitgangsweerstand aanbieden aan overige schakelingen. U kunt een lijndriver bijvoorbeeld gebruiken als u het uitgangssignaal van een geluidsmenger naar diverse, ver van elkaar verwijderde eindversterkers moet sturen. De eindtrap bestaat uit complementaire emittervolgers T2 en T3, de eerste transistor T1 zorgt voor een bepaalde ruststroom door de emittervolgers die de crossover vervorming moet verminderen.
Door de stevige terugkoppeling naar de inverterende ingang van de operationele versterker zal de schakeling, ondanks deze ruststroom, toch onder alle mogelijke omstandigheden stabiel blijven. Iedere afwijking van de rusttoestand, waarbij de uitgang op 0 V staat, wordt immers onmiddellijk gecorrigeerd door de terugkoppeling.



Voorbeeldschakeling van een lijndriver. (© 2023 Jos Verstraten)

De inverterende versterker als mengversterker
Mengversterkers zijn onmisbare schakelingen in de laagfrequent techniek. Iedere radio-, TV- of opnamestudio staat er vol van! In de eenvoudigste uitvoering bestaat zo'n mengtrap uit een resistieve menger. Het principeschema daarvan is getekend in de onderstaande figuur.
In dit schema worden drie ingangssignalen IN1, IN2 en IN3 via serieweerstanden aangeboden aan een sommeerpunt. Dit punt ligt aan de inverterende ingang van een als inverterende versterker geschakelde operationele versterker. Tussen dit punt en de uitgang is de mengweerstand R4 opgenomen. De niet-inverterende ingang gaat weer via een weerstand R5 naar de massa. Deze ingang ligt dus op 0 V en de schakeling zal ook de spanning op de inverterende ingang op 0 V zetten. Het gevolg is dat de signalen op de ingangen nu stromen door de weerstanden R1, R2 en R3 sturen die afvloeien naar een punt dat op 0 V staat. De som van alle stromen kan alleen via de mengweerstand R4 verder vloeien naar de uitgang van de operationele versterker.
De drie ingangsspanningen kunnen elkaar dus absoluut niet beïnvloeden!

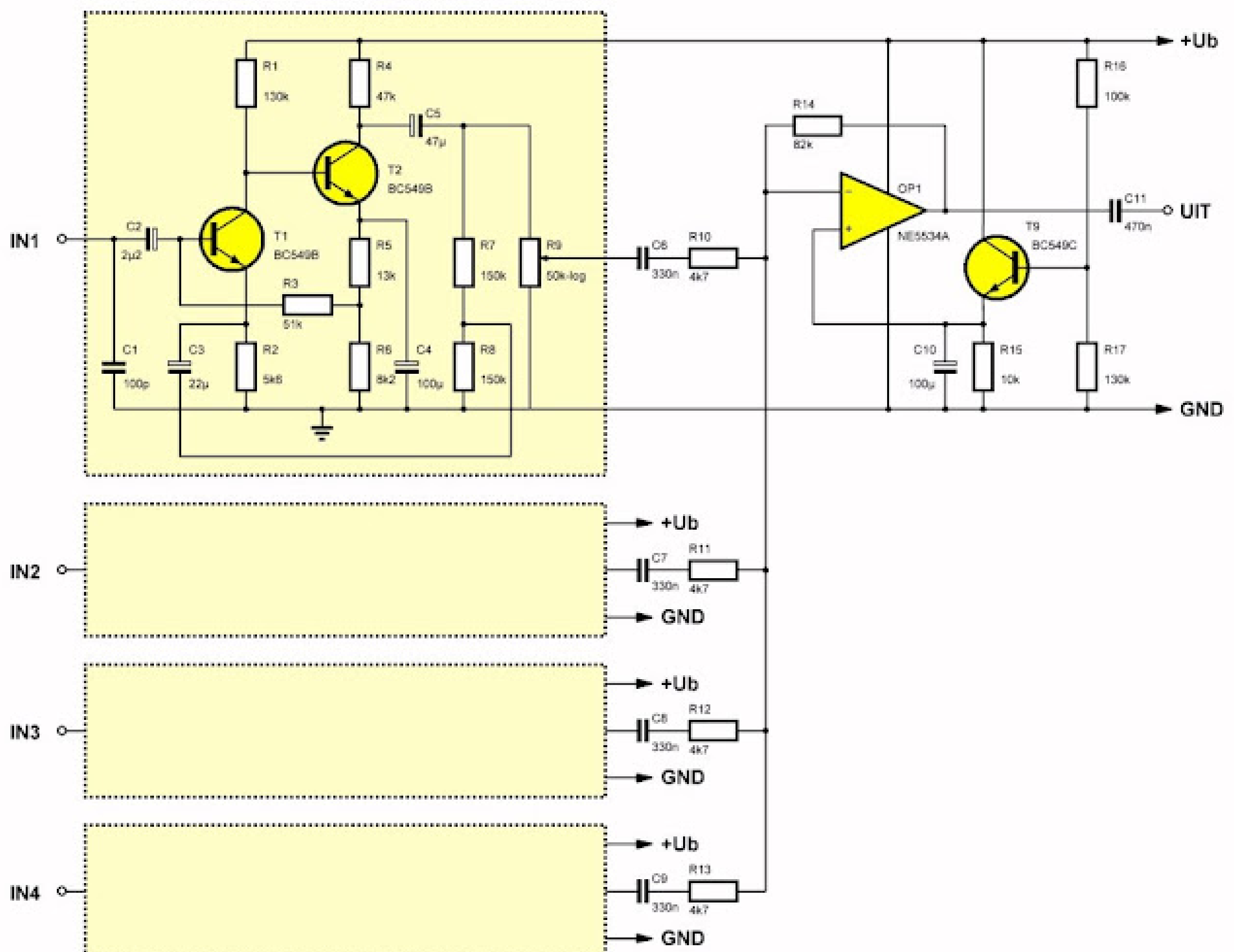


Voorbeeldschakeling van een mengversterker.
(© 2023 Jos Verstraten)

De versterking van iedere ingang kan heel eenvoudig worden ingesteld door de verhouding van de weerstand R4 tot de serieweerstanden R1 tot en met R3 van de ingangen op een

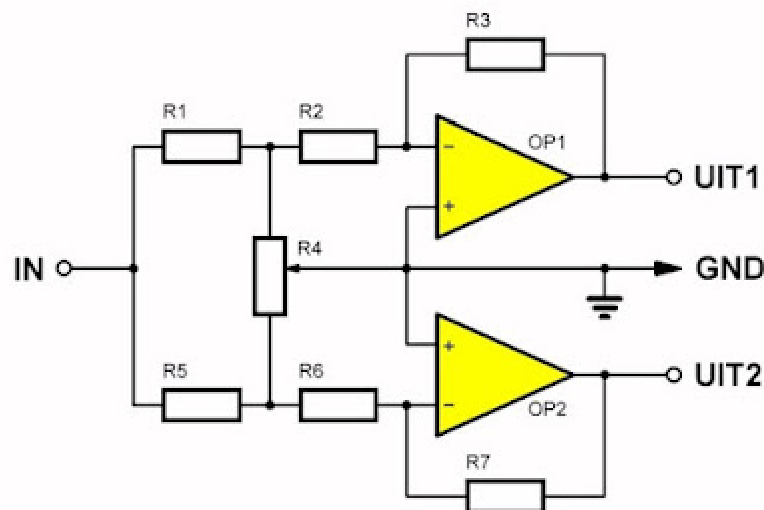
bepaalde waarde vast te leggen. Het is dus mogelijk aan iedere ingang een eigen specifieke gevoeligheid toe te kennen.
Deze mengschakeling wordt ook wel eens '*de menger met virtuele massa*' genoemd. Hoewel het mengpunt op een spanning van 0 V staat, dus op dezelfde spanning als op de massa terug te vinden is, kan men toch niet beweren dat dit punt aan de massa ligt. De schakeling zorgt er alleen voor dat de spanning steeds op massapotentiaal blijft.
Het zal, als rechtstreeks gevolg van dat virtuele massapunt, ook wel duidelijk zijn dat iedere ingang een ingangsweerstand heeft die gelijk is aan de waarde van de serieweerstand van deze ingang.

Een praktische schakeling van een mengversterker met virtuele massa
In de onderstaande figuur is een praktische schakeling van een mengversterker getekend, waarin een aantal van de besproken technieken wordt toegepast. De schakeling kunt u gebruiken voor het mengen van vier microfoonsignalen. De vier voorversterkers zijn samengesteld rond transistoren. In principe kunt u dergelijke versterkers ook met operationele versterkers bouwen, maar het nadeel van deze onderdelen is dat zij veel meer ruis produceren. De uitgangen van de voorversterkers worden afgesloten met potentiometers R9, waarmee u de amplitude van de vier signalen kunt instellen. De lopers van deze potentiometers gaan via scheidingscondensatoren C6 tot en met C9 en serieweerstanden R10 tot en met R13 naar het virtuele massapunt, verbonden met de inverterende ingang van de operationele versterker.
Omdat de schakeling uit een enkelvoudige positieve voedingsspanning $+U_b$ wordt gevoed, wordt de niet-inverterende ingang van de operationele versterker ingesteld op de helft van deze voedingsspanning. Daarvoor zorgt de emittervolger T9. De basis van deze halfgeleider is aangesloten op een spanningsdeler R16/R17 tussen de massa en de voeding. De emitter staat op een spanning die ongeveer 0,65 V lager is dan de spanning op de basis. Vandaar dat beide weerstanden van de deler niet even groot zijn, de basis wordt ingesteld op een spanning die iets groter is dan de helft van de voeding. De instelspanning voor de niet-inverterende ingang wordt ontkoppeld met behulp van de condensator C10.



Een praktisch voorbeeld van een mengversterker met virtuele massa. (© 2023 Jos Verstraten)

De panning-versterker
In de onderstaande figuur zijn twee inverterende versterkers getekend, die worden gebruikt om een ingangssignaal te '*pannen*'. Dat is een vakterm uit de geluidstechniek, waarmee wordt aangegeven dat een ingangssignaal op een instelbare manier wordt verdeeld over twee uitgangen. De benaming '*panning*' komt van het woord '*panorama*' en met een dergelijke schakeling kunt u bijvoorbeeld het signaal van een monofone microfoon van links naar rechts door het geluidsbeeld van een stereo-installatie laten lopen.
Het ingangssignaal wordt aan twee identieke inverterende versterkers aangeboden. Tussen de ingang en deze versterkers staat echter een resistief netwerkje, samengesteld uit twee verzwakkers. De ene verzwakker bestaat uit de vaste weerstand R1 en het bovenste deel van de potmeter R4. De tweede verzwakker is opgebouwd uit de vaste weerstand R5 en het onderste deel van de potmeter R4. De weerstanden in beide versterkers hebben identieke waarden.
Als de loper van de potmeter in de middenstand staat, zijn beide delers identiek. De inverterende ingangen van de twee versterkers worden dan met identieke signalen gestuurd, ook de twee uitgangssignalen zijn even groot. Verdraait u de loper van de potmeter, dan wordt deze gelijkheid doorbroken. Het gevolg is dat of de bovenste, of de onderste versterker meer signaal krijgt. Het ingangssignaal wordt dan niet meer evenredig verdeeld over beide uitgangen maar in een mate die wordt bepaald door de stand van de loper van de potentiometer. Staat de loper in een van de uiterste standen, dan zal een van de uitgangen helemaal geen signaal leveren.



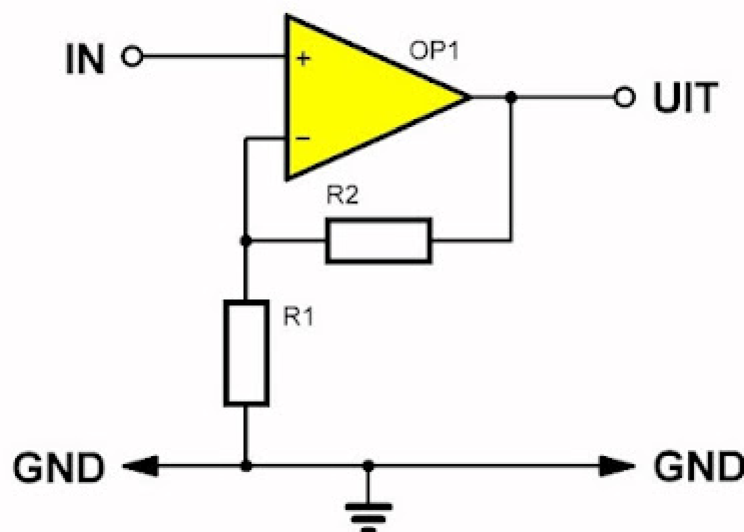
Het schema van een panning-versterker.
(© 2023 Jos Verstraten)

De op-amp als niet-inverterende versterker

Inleiding
De inverterende versterker heeft twee nadelen. Op de eerste plaats het reeds genoemde feit dat de versterkingsfactor afhankelijk is van de inwendige weerstand van de bron, op de tweede plaats het feit dat de schakeling een tamelijk lage ingangsweerstand heeft. Deze wordt immers volledig bepaald door de weerstand tussen de signaalingang en de inverterende ingang van de op-amp. Nu lijkt het dat er niets op tegen is om deze weerstand erg hoog te kiezen, bijvoorbeeld 1 MΩ. Maar wilt u dat de schakeling het signaal ook nog versterkt, dan moet u voor de tweede versterkingsbepalende weerstand een onrealistisch hoge waarde kiezen. Wilt u in het gestelde voorbeeld de schakeling honderd keer laten versterken, dan moet u de terugkoppelweerstand tussen uitgang en inverterende ingang een

waarde van 100 MΩ geven! Dan gaan parasitaire capaciteiten een doorslaggevende rol spelen en kunt u vergeten dat u een schakeling ontwerpt die iets nuttig presteert.
Een voor sommige toepassingen extra nadeel van de schakeling is dat het uitgangssignaal 180°in fase is gedraaid is ten opzichte van het ingangssignaal.

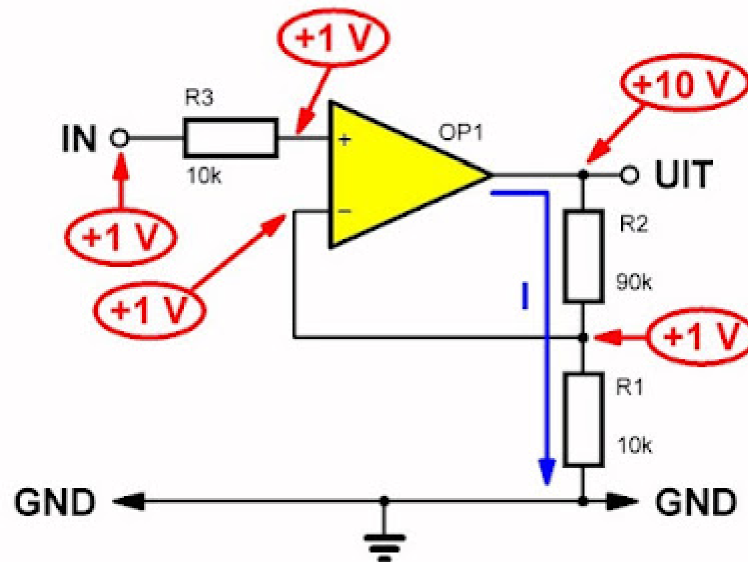
Het basisschema van de niet-inverterende versterker
Het basisschema van de niet-inverterende spanningsversterker met een operationele versterker is getekend in de onderstaande figuur. Het ingangssignaal wordt rechtstreeks aangeboden aan de niet-inverterende ingang van de operationele versterker. De versterkingsfactor wordt ook nu weer bepaald door twee weerstanden in een terugkoppellus tussen de uitgang en de inverterende ingang. De versterking van de schakeling wordt gegeven door de uitdrukking:
$U_{uit} = U_{in} \bullet [(R1 + R2) / R1]$
Uit dit schema blijkt duidelijk dat de ingangsweerstand van de schakeling zeer hoog kan zijn. Deze wordt in feite alleen begrensd door de ingangsweerstand van de niet-inverterende ingang van de operationele versterker. Bij moderne FET op-amp's kan deze waarde in de GΩ's liggen. In de praktijk moet u meestal de ingangsweerstand verkleinen door een weerstand tussen de niet-inverterende ingang en de massa op te nemen.
Bovendien zal het duidelijk zijn dat de bronschakeling geen enkele invloed heeft op de versterkingsfactor van de schakeling. De spanningsdeler die deze factor bepaalt staat immers helemaal los van externe schakelingen en is eigen aan de trap.



Basisschema van de niet-inverterende versterker.
(© 2023 Jos Verstraten)

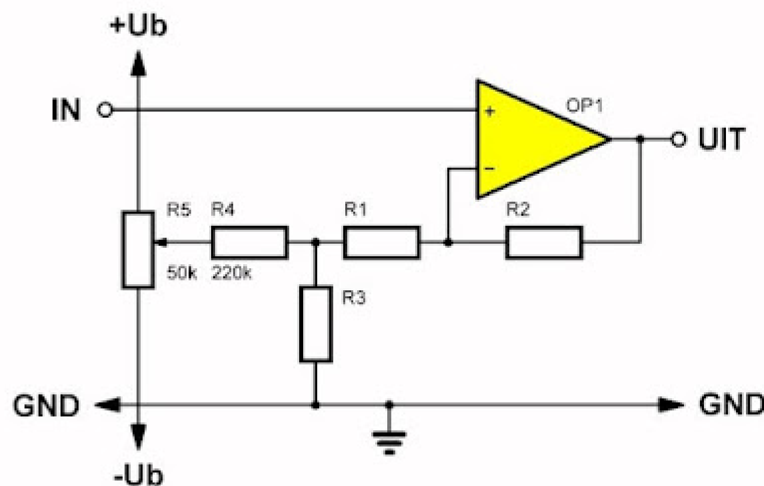
Verklaring van de werking
De werking van de schakeling wordt toegelicht aan de hand van de onderstaande figuur, waarin het basisschema op een iets andere manier is getekend. Aan de weerstanden is een waarde toegekend, zodat u de wet van ohm kunt toepassen. De niet-inverterende ingang wordt bovendien door middel van een serieweerstand R3 met de signaalbron verbonden. Meestal kiest men de waarde zo dat deze gelijk is aan de parallel schakeling van R1 en R2. Stel dat u aan de schakeling een spanning van +1 V aanbiedt. Vanwege de zeer hoge ingangsweerstand van de niet-inverterende ingang komt deze spanning onverzwakt terecht op deze ingang van de operationele versterker. Ook nu zal de op-amp behoefte voelen om het spanningsverschil tussen zijn beide ingangen nul te maken. De schakeling regelt zijn uitgangsspanning zodanig dat ook op de inverterende ingang een spanning van +1 V verschijnt. Uiteraard staat deze spanning ook op het knooppunt van de weerstanden R1 en R2. Over de weerstand R1 staat een spanning van 1 V. Er moet dus een stroom door dit onderdeel vloeien, stroom die alleen geleverd kan worden door de uitgang van de operationele versterker. Omdat de twee weerstanden R1 en R2 in serie staan kan het niet

anders dan dat deze stroom I ook door de weerstand R2 vloeit. In het getekende voorbeeld is deze weerstand echter negen keer groter dan zijn soortgenoot R1.
Het gevolg is, zie de wet van ohm, dat er over dit onderdeel een spanning valt die negen keer groter is dan de spanningsval over R1. Er valt bijgevolg 9 V over R2, de uitgang van de operationele versterker staat op een spanning van 9 V + 1 V is gelijk aan +10 V.
De schakeling versterkt tien keer, hetgeen ook het resultaat is als u de weerstandswaarden invult in de eerder gegeven formule van de versterkingsfactor.



De werking van de niet-inverterende versterker.
(© 2023 Jos Verstraten)

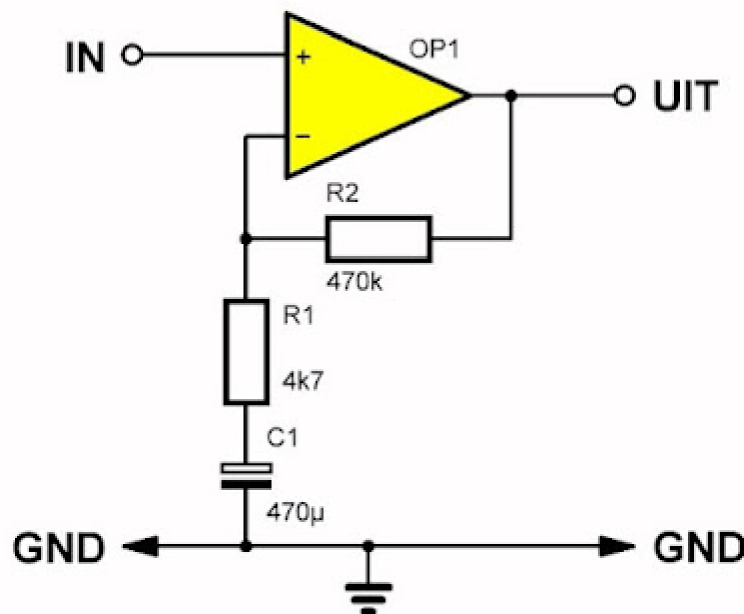
Offsetcompensatie bij de niet-inverterende versterker
Het schema voor de externe offsetcompensatie van de niet-inverterende versterker is getekend in de onderstaande figuur. De compensatie potentiometer R5 wordt aangesloten tussen beide voedingsspanningen en stuurt een kleine stroom via de weerstand R4 naar een deel van het terugkoppel netwerk. De weerstand R1 uit de vorige figuur is nu gesplitst in twee in serie geschakelde weerstanden R1 en R3. Als R4 zeer groot is ten opzichte van deze weerstanden kunt u de invloed van de offsetcompensatie op de versterking van de schakeling verwaarlozen.



Offsetcompensatie bij de niet-inverterende versterker.
(© 2023 Jos Verstraten)

De invloed van de offset op de schakeling
Met een niet-inverterende versterker kunt u in theorie schakelingen maken die vele duizenden malen versterken. Er ontstaat dan echter een probleem met de offsetspanning van

de operationele versterker. De offsetspanning is op te vatten als een zeer kleine gelijkspanning van ongeveer 1 tot 5 mV die tussen de twee ingangen staat. De op-amp beschouwt deze spanning als een spanningsverschil tussen beide ingangen en zal proberen dit verschil weg te regelen. Dat kan alleen maar door een spanning van tegengestelde polariteit op de uitgang te zetten die via de terugkoppel weerstand tussen de uitgang en de inverterende ingang de offset compenseert.
Maar als de schakeling duizenden maal versterkt en de weerstand R2 dus zeer groot is ten opzichte van weerstand R1 kan dat alleen maar als de uitgangsspanning tot in het V-bereik stijgt! Het gevolg is dat de rustspanning op de uitgang van de schakeling dan niet meer 0 V is, maar tamelijk positief of negatief. U kunt dan de schakeling niet langer volledig uitsturen met een wisselspanningssignaal. De uitgangsspanning zal dan snel vastlopen tegen een van de voedingsspanningen.
Om dit probleem te verhelpen kunt u de schakeling van de onderstaande figuur toepassen. Bij deze schakeling wordt een condensator C1 in serie geschakeld met de onderste weerstand R1 van het terugkoppel netwerk. Deze condensator heeft tot gevolg dat de terugkoppeling voor gelijkspanningen niet actief is. De condensator heeft immers voor gelijkspanning een oneindig hoge weerstand. Voor gelijkspanning lijkt het dus net of de schakeling een spanningsvolger is met een spanningsversterking van +1. De enige gelijkspanningsterugkoppeling bestaat nu immers uit de weerstand R2 van 470 kΩ tussen de uitgang en de inverterende ingang. Een typische spanningsvolger!
Om de gelijkspanningsoffset te compenseren volstaat het nu dat de schakeling dezelfde spanning als de waarde van de offset op de uitgang zet, maar uiteraard met tegengestelde polariteit. Deze spanning wordt onverzwakt teruggekoppeld naar de inverterende ingang en compenseert de offset.

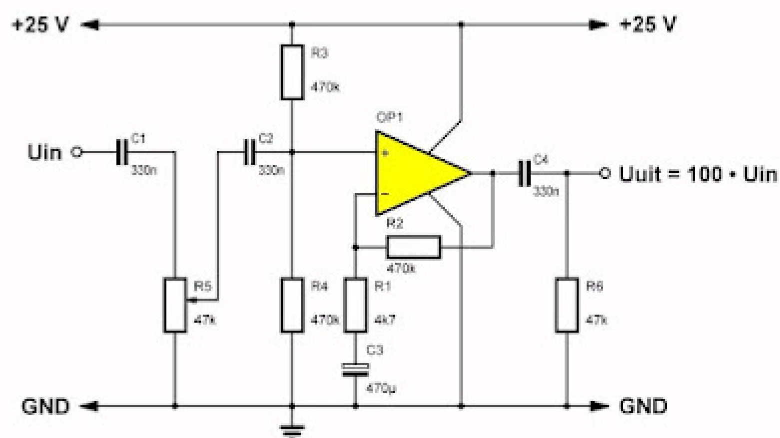


De invloed van de offset uitschakelen.
(© 2023 Jos Verstraten)

Voor signaalspanningen vanaf een bepaalde frequentie werkt de schakeling wél als versterker. De condensator heeft immers een bepaalde wisselspanningsweerstand en deze staat in serie met de weerstand R1 van 4,7 kΩ. Als u er voor zorgt dat deze wisselspanningsweerstand over het gehele te versterken frequentiegebied klein is ten opzichte van de waarde van de weerstand is zijn invloed te verwaarlozen. Dat betekent dat u in de meeste gevallen een tamelijk grote elektrolytische condensator moet gebruiken.

De niet-inverterende versterker met enkelvoudige voeding
Het is mogelijk de vorige schakeling zo uit te breiden dat u gebruik kunt maken van een enkelvoudige voedingsspanning. Omdat deze in de meeste gevallen positief zal zijn ten

opzichte van de massa wordt er in het schema van de onderstaande figuur ook van deze situatie uitgegaan.
De operationele versterker wordt gevoed tussen de spanning van +25 V en de massa. Tussen de massa, de inverterende ingang en de uitgang is het terugkoppel netwerk van de vorige figuur aangebracht. De niet-inverterende ingang is verbonden met het knooppunt van een weerstandsdeler R3/R4. Deze is aangesloten tussen de voeding en de massa en omdat beide weerstanden even groot zijn staat er op het knooppunt een spanning van precies de helft van de voedingsspanning. Deze spanning staat uiteraard ook op de niet-inverterende ingang. De schakeling stelt immers de spanningen op de uitgang en de inverterende ingang zo in dat er weer een spanningsverschil van 0 V tussen beide ingangen ontstaat.
Omdat de schakeling voor gelijkspanningen werkt als spanningsvolger (condensator C3 in de terugkoppeling) zal deze situatie ontstaan als ook de uitgang zich instelt op de helft van de voedingsspanning. De schakeling staat dus optimaal ingesteld en kan zowel in positieve als in negatieve zin maximaal worden uitgestuurd.
Het te versterken signaal wordt via een potentiometer R5 en een scheidingscondensator C2 aangeboden aan de niet-inverterende ingang. De condensator laat wel de wisselspanning van het te versterken signaal door, maar spert de instelspanning op de niet-inverterende ingang. Het versterkte signaal wordt van de uitgang afgenomen via de scheidingscondensator C4.



Niet-inverterende versterker met enkelvoudige voeding.
(© 2023 Jos Verstraten)

De niet-inverterende versterker in de praktijk

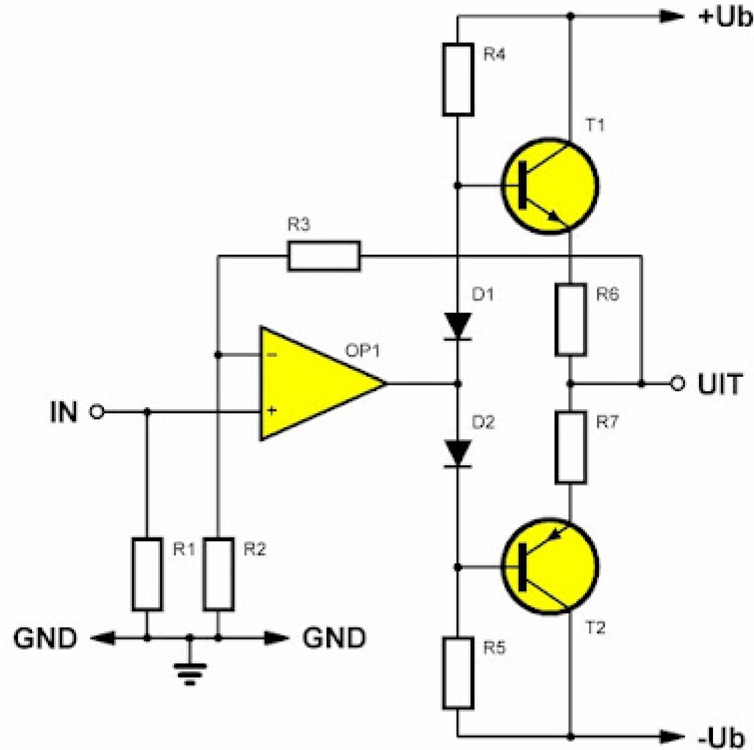
Inleiding

De niet-inverterende versterker wordt, vanwege zijn zeer hoge ingangsweerstand en door externe schakelingen niet te beïnvloeden versterkingsfactor, zeer vaak toegepast in allerlei schakelingen. In de volgende paragraafjes wordt de toepassing als driver voor eindversterkers besproken en worden twee minder bekende, maar wel nuttige toepassingen aan de orde gesteld.

Driver voor eindversterkers

In de onderstaande figuur is het standaard schema getekend van een lijndriver met een niet-inverterende versterker aan de ingang. In feite is er erg weinig verschil met het eerder besproken schema waarbij een inverterende versterker wordt gebruikt. Alleen het terugkoppel netwerk R2/R3 is uiteraard anders. Tussen de niet-inverterende ingang en de massa is een weerstand R1 geschakeld. Deze weerstand legt de ingangsweerstand van de schakeling vast. Zonder deze weerstand zou de schakeling een ingangsweerstand hebben die in het GΩ bereik ligt en zou de schakeling met open ingang veel te veel stoorsignalen uit de omgeving oppikken. U doet er dus verstandig aan de ingangsweerstand kunstmatig tot een reële waarde te verlagen.

De twee eindtransistoren worden door middel van de serieschakeling van de weerstanden R4 en R5 en de dioden D1 en D2 ingesteld in klasse AB.

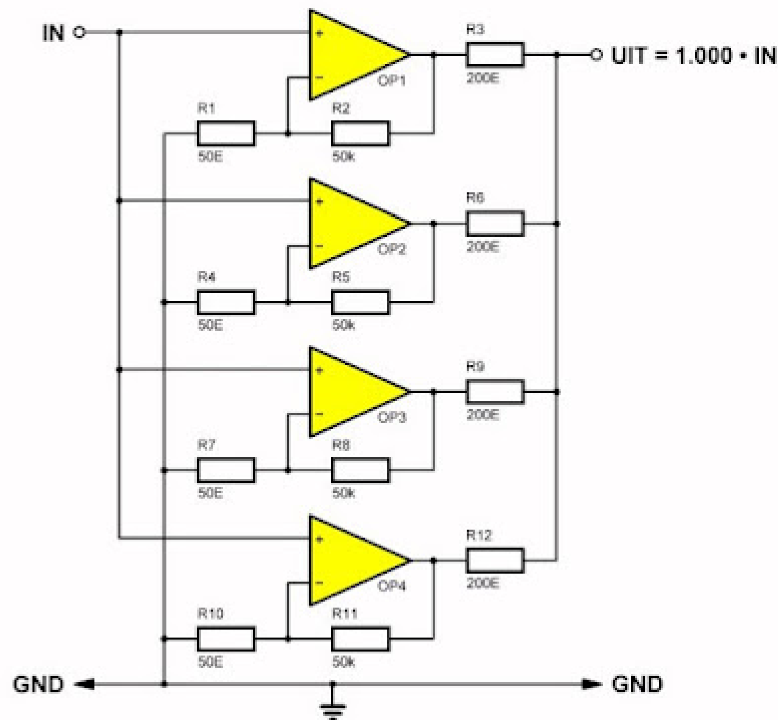


Een driver voor eindversterkers. (© 2023 Jos Verstraten)

Een 25 W audio eindversterker
In de onderstaande figuur is het praktisch bruikbare schema getekend van een 25 W audio versterker. Als op-amp wordt een LM5534 toegepast. De eindtrap bestaat uit een PNP/NPN en een NPN/PNP combinatie. Het vermogen wordt geleverd door de beroemde complementaire transistoren MJE2955 en MJE3055 die in de jaren zestig als eerste door Motorola op de markt werden gebracht, maar nu nog steeds door een heleboel fabrikanten worden aangeboden. De noodzakelijke ruststroom voor de instelling van de eindtrap in klasse AB wordt verzorgd door T1. De ruststroom is instelbaar via de instelpotentiometer R10. U kunt deze ruststroom instellen met een klein sinussignaal op de ingang en een oscilloscoop op de uitgang van de versterker. Regel de potentiometer af tot de crossover vervorming helemaal uit het uitgangssignaal is verdwenen.
De condensatoren C5 en C7 verzorgen de frequentiecompensatie van het ontwerp. De LM5534 kan uiteraard niet uit voedingsspanningen van ±35 V worden gevoed. Met behulp van de twee zenerdioden D1 en D2 en de condensatoren C3 en C4 worden twee symmetrische spanningen van 15 V gegenereerd voor de op-amp. De condensator C2 zorgt ervoor dat de offsetspanning van de op-amp niet op de uitgang kan verschijnen. De spanningsversterking wordt uiteraard vastgelegd door de weerstanden R3 en R20.

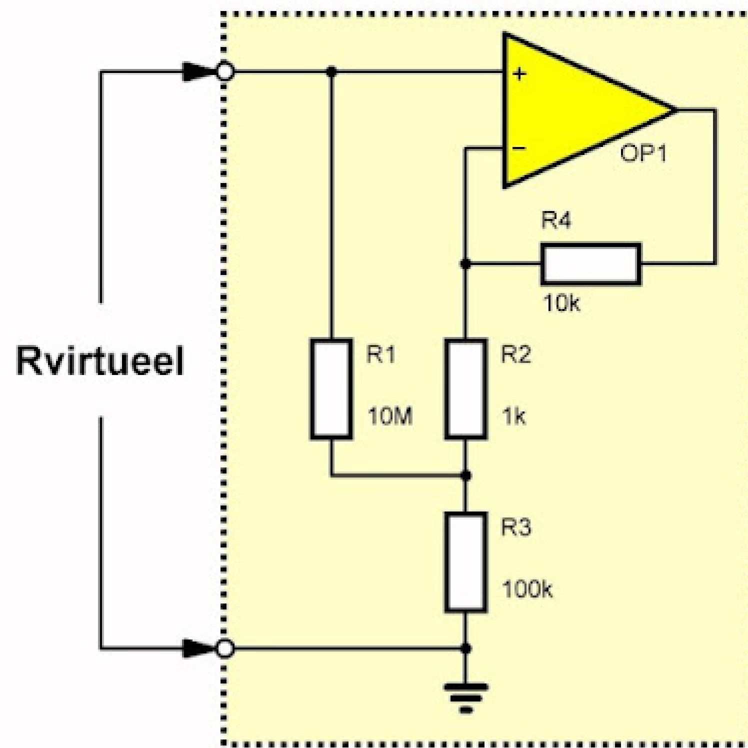
Een 25 W audio eindversterker. (© 2023 Jos Verstraten)

Een zeer ruisarme versterker
Sommige moderne op-amp's zijn relatief ruisvrij. Soms is de gegenereerde ruisspanning echter tóch te groot voor het doel waarvoor de schakeling moet worden gebruikt. Dat is het geval als u een heel klein signaal flink moet versterken. Er bestaat een techniek om de ruis van operationele versterkers te verminderen.
Als u, zoals voorgesteld in de onderstaande figuur, een aantal identieke versterkers parallel schakelt, dat zal de ruis op de uitgang aanmerkelijk lager liggen dan wanneer u maar één schakeling toepast. Dat verschijnsel is te verklaren uit het willekeurige verloop van een ruisspanning. Als de ene op-amp op een bepaald moment een ruisspanning van +2 mV genereert, dan is het zeer waarschijnlijk dat een van de andere op-amp's een negatieve ruisspanning van ongeveer dezelfde grootte opwekt. Het gevolg is dat deze twee ruisspanningen elkaar grotendeels compenseren. Hetzelfde verhaal geldt uiteraard ook voor de overige versterkers in de schakeling.
Let op de vier weerstanden die in serie met de individuele uitgangen van de op-amp's zijn geschakeld. Deze zorgen ervoor dat de vier uitgangssignalen resistief worden gemengd en dus ook voor het onderling compenseren van de ruissignalen.
Uit de waarden van de weerstanden kunt u afleiden dat deze schakeling een spanningsversterking van duizend heeft!
Omdat er IC's op de markt zijn die vier identieke op-amps's bevatten kunt u een dergelijke schakeling met slechts één IC'tje ontwerpen.



Een zeer ruisarme versterker. (© 2023 Jos Verstraten)

Een weerstandsvermenigvuldiger
Het zal in de praktijk wel niet vaak voorkomen dat u weerstanden nodig hebt van meer dan 10 MΩ. U kunt in voorkomende gevallen een niet-inverterende versterker gebruiken om de waarde van een weerstand met een bepaalde factor te vermenigvuldigen. De elektronica *'ziet'* de schakeling rond de op-amp als een weerstand $R_{virtueel}$ met een zeer hoge waarde ten opzichte van de massa.
Het schema van een dergelijke weerstandsvermenigvuldiger is getekend in de onderstaande figuur. De schakeling maakt gebruik van een niet-inverterende versterker en een referentieweerstand R1, waarvan de waarde wordt vermenigvuldigd met de verhouding tussen de weerstanden R3 en R2:
$R_{virtueel}$ = R1 • [R3 / R2]
In het getekende voorbeeld is deze verhouding 100 en de referentieweerstand 10 MΩ, zodat de schijnbare weerstand tussen ingang en massa gelijk is aan 1 GΩ.



Een weerstandsvermenigvuldiger.
(© 2023 Jos Verstraten)